

## **ОБЩИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ РАЗНООБРАЗИЯ ЭКОСИСТЕМ БИОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ЖИВЫХ СИСТЕМ**

<sup>1</sup>Ланкин Ю.П., <sup>2</sup>Иванова Н.С.

<sup>1</sup>Институт биофизики СО РАН, Красноярск

Красноярск, Россия (660036, г. Красноярск, Академгородок) [lan7@mail.ru](mailto:lan7@mail.ru)

<sup>2</sup>Ботанический сад УрО РАН, Екатеринбург

Екатеринбург, Россия (620144, г. Екатеринбург, ул. 8-Марта, 202) [i.n.s@bk.ru](mailto:i.n.s@bk.ru)

На основе анализа литературы и результатов собственных многолетних исследований обосновывается необходимость совершенствования теоретико-методической основы для моделирования природных экосистем. В целях построения универсальных экосистемных моделей предлагается использовать такие фундаментальные свойства живых систем, как аттрактивность, адаптивность, фрактальность, сетевая организация; использовать объединение трех типов концепций: субстратных, энергетических и информационных. Обсуждаются преимущества разработанного в нейроинформатике инструментария. Выявляется огромный диапазон потенциальных возможностей сетевых моделей. Они могут перекрывать весь диапазон модельных представлений – от глубоко фундаментальных до чисто имитационных. Благодаря этому появляется возможность имитировать процесс постепенной формализации знаний.

**Ключевые слова:** экология, экосистемы, биосфера, сети организмов, математическое моделирование, концепция адаптивной самоорганизации, фракталы, сложные системы, эволюция, прогнозирование.

## **THE GENERAL APPROACH TO MODELLING OF BIOSPHERE ECOSYSTEMS DIVERSITY ON THE BASIS OF FUNDAMENTAL PROPERTIES OF LIVE SYSTEMS**

<sup>1</sup>Lankin Yu.P., <sup>2</sup>Ivanova N.S.

<sup>1</sup>Institute of Biophysics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk

Krasnoyarsk, Russia (660036, Akademgorodok) e-mail: [lan7@mail.ru](mailto:lan7@mail.ru)

<sup>2</sup>Botanical Garden of Ural Branch RAS, Yekaterinburg

Yekaterinburg, Russia (620144, Yekaterinburg, 8<sup>th</sup> March Str., 202) [i.n.s@bk.ru](mailto:i.n.s@bk.ru)

The necessity of perfection of the theoretic-methodical basis for natural ecosystems modeling is proved on the basis of the literature analysis and results of own long-term researches. In order to construction universal ecosystems models it is offered to use such fundamental properties of live systems as attractiveness, adaptability, fractal, the network organization; to use association of three types of concepts: substrate, power and information. The advantages developed in neuroinformatics tools are discussed. The huge range of network models potential possibilities is revealed. It can block all range of modeling representations – from deeply fundamental to purely imitating. Because of this, it is a possibility to simulate process of knowledge gradual formalization.

**Key words:** ecology, ecosystems, biosphere, networks of organisms, mathematics modeling, conception of adaptive self-organization, fractals, complex systems, evolution, prediction.

В настоящее время сложилось представление об уникальности природных экосистем. Это связано, с одной стороны, с их огромным разнообразием, а с другой, направленностью исследований на выявление, прежде всего, различий в их организации, но не общих свойств. Отсутствие понимания общей основы в организации экосистем препятствует построению универсальных экосистемных моделей, пригодных для эффективной их интеграции в модели биосферы. Проблема резко усугубляется отсутствием достаточно мощных и гибких математических методов, способных отразить фундаментальные свойства природных систем, порождающие наблюдаемое многообразие.

Целью нашей работы является развитие теоретико-методической основы для универсального подхода к описанию, анализу и моделированию экосистем в контексте экосистемы наивысшего уровня – биосферы. Моделирование ведется на основе разрабатываемой Концепции Адаптивной Самоорганизации сложных природных систем (КАС) [10, 22, 12]. Верификация моделей – на основе оригинального отечественного направления лесной науки – генетической лесной типологии [8, 3].

Предполагается цикл из трех статей: 1) базовые понятия, 2) основы теории и 3) примеры моделей.

### Проблемы методологии и поиск путей решения

Ввиду чрезвычайного разнообразия, динамичности и поливариантности развития экосистем (рис. 1), чрезвычайно сложно предложить общетеоретический подход для их описания и анализа.

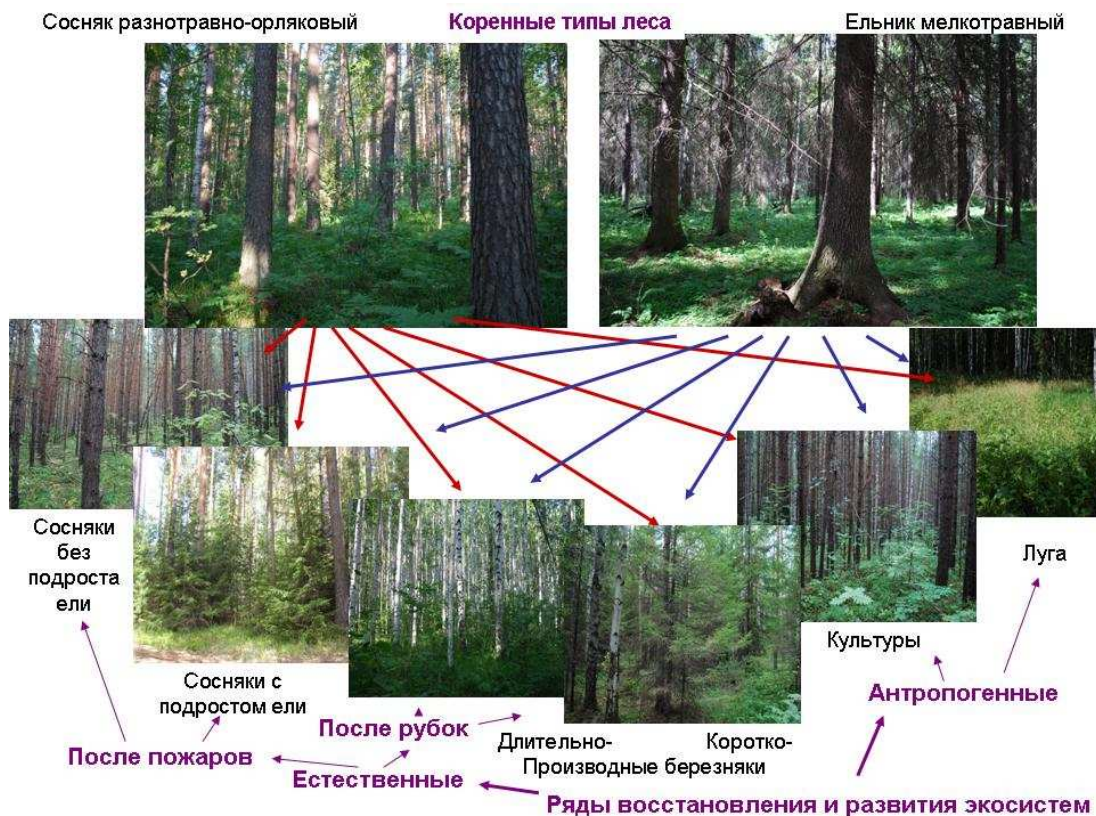


Рис. 1. Гипотеза дивергенции и конвергенции лесной растительности на Среднем Урале

Еще в более тяжелой ситуации находится математическая экология, требующая четких и однозначных формулировок для создания математических методов. Более того, в современной науке отсутствуют разделы математики, охватывающие своими методами все многообразие, сложность и гибкость проявлений живой природы.

Сложившаяся в науке ситуация привела к методологическому тупику, выразившемуся в огромном разрыве между экспериментальной (полевой) и математической экологией [16]: "Возникают как две дисциплины – "бумажное" экологическое моделирование на основе положений из учебников, где все поставленные проблемы легко решаются, и реальное моделирование, для которого быстро выясняется, что применить учебники к конкретным экологическим ситуациям часто (всегда?) не получается". И далее: "Безусловно, мало надежды на то, что удастся быстро создать всеобъемлющую теорию описания и моделирования экологических систем".

Рассматривая ситуацию, сложившуюся в науке в целом, можно констатировать следующее. Наука эволюционирует волнами, двигаясь от холизма к редукционизму и обратно. Предшествующий период развития был представлен преобладанием редукционизма, т.е. накопления фактов, погружения в детали, все большей специализации и разобщения знания и постепенной потери перспективы из-за невозможности обобщения и отслеживания огромного объема накапливаемых данных. Один из аспектов этого разобщения – разрыв между теорией и экспериментом, что особенно заметно в экологии. Все указывает на то, что пришло время холистических обобщений – выявления наиболее

важного, фундаментального в накопленном опыте, формализации этой квинтэссенции знания и соединения теоретической и экспериментальной науки на новом фундаментальном уровне.

Многие отечественные и зарубежные исследователи "атакуют" эту проблему с разных сторон и на основе различных представлений. Так А.М. Гиляров [4]) ищет универсальные закономерности организации сообществ, причину и механизмы формирования биоразнообразия на основе концепции нейтрализма. В.А. Усольцевым [17]) разработаны универсальные многомерные регрессионные модели фитомассы деревьев на основе физиологически обусловленных закономерностей, а также ее вертикально-фракционного распределения как характеристики структурно-функциональной организации лесных фитоценозов. На основе единых принципов эколого-флористического подхода [13, 20, 24] по всему миру классифицируется самая разнообразная растительность. Фрактальный подход служит для поиска общих закономерностей организации экосистем разной масштабности [1], а также таксономического разнообразия [2]. Развивается математическая теория категорий и функторов для количественного и динамического описания Мира [11], концепция Гайи (Геи) [21 и др.], включающая не только качественную теорию, но и ряд количественных моделей.

Тем не менее, проблема столь глубока, что требует весьма нетривиальных решений, граничащих со сменой господствующей научной парадигмы. В математических теориях этот процесс уже активно идет и выражается в появлении и бурном развитии таких наук, как синергетика, теория динамических систем, теория самоорганизованной критичности и др.

### **Аттрактивность, адаптивность, фрактальность, сетевая организация**

Общность подхода к моделированию экосистем просматривается при взгляде на планету с уровня (масштаба) биосферы. Являясь глобальной экосистемой, она содержит множество (иерархию) подсистем – экосистем различных масштабов и сложности.

Однако традиционный системный подход, сформированный в прошлом веке в кибернетике и представляющий систему как иерархию взаимосвязанных блоков, выстроенных исследователем "вручную", здесь не подходит из-за высокой гибкости и поливариантности процессов развития экосистем. Другой особенностью системного подхода, ограничивающей применимость традиционных механистических и статистических методов, является известный тезис о несводимости свойств системы к сумме свойств ее элементов и невыводимости свойств системы из свойств ее элементов. Неприменимость парадигмы линейной причинности связана с нелинейностью свойств сложных природных систем, быстро приводящей к проблемам типа "горизонта прогноза" для их простых моделей, крайне высокой чувствительностью к слабым сигналам и воздействиям, способным скачком изменить состояние системы, множеством возможных режимов функционирования, способностью по-разному реагировать на сходные ситуации и сходным образом на внешне сходные ситуации и т.д.

Пытаясь понять необозримую сложность и вариативность биосферы и составляющих ее экосистем, необходимо отталкиваться от ряда фундаментальных принципов, многие из которых уже известны современной науке: аттрактивность, адаптивность, фрактальность, сложность сетевой организации и др.

Аттрактивность здесь подразумевает наличие множества аттракторов (стационарных или квазистационарных состояний) системы, обеспечивающих ее устойчивость к воздействию множества разнообразных факторов, нарушающих ее динамическое равновесие. Биосфера и составляющие ее экосистемы стремятся к стационарным состояниям или стационарным колебательным режимам, хотя не всегда их достигают. Стремясь к стационарным состояниям, биосфера и ее экосистемы уходят от нарастания хаотических, нестационарных режимов, развитие которых неизбежно привело бы к разрушению системы. Этот тезис обосновывается тем, что наряду с высокой устойчивостью биосферы и ее компонентов, в экологии имеется достаточно много примеров развития

нескомпенсированных неустойчивостей, приведших к разрушению экосистем. Причины их самые различные: внесение в экосистему "чуждых" видов, не имеющих в ней естественных врагов, природные катаклизмы, антропогенные воздействия и т.д. К счастью, благодаря гибкости и адаптивности биосферы эти нарушения в целостности тонкой пленки жизни на поверхности планеты и в океане ей, в основном, удается компенсировать.

Эта способность сложных природных систем компенсировать деструктивные изменения и воздействия отразилась в известном физическом принципе Ле Шателье и кибернетическом принципе отрицательной обратной связи, а в экологии и биологии в представлении об адаптации. Можно предположить, что системы, не обладающие этим механизмом или имевшие неэффективную его организацию, в эволюции просто не выжили. Рассматривая ключевой тезис о внутренней целостности и тесной взаимосвязи элементов любых природных систем, включая биосферу и организмы, образующие ее экосистемы, в совокупности с механизмами стабилизирующей обратной связи, мы с неизбежностью приходим к концепции биосферного гомеостаза, который в феноменологическом плане соответствует гомеостазу организменному.

В этом плане полезно сопоставить тепличные условия нашей планеты с бурными процессами планетарного масштаба на ближайших планетах, не обладающих биосферой – Марсе и Венере. Попытки свести эти различия к чисто физическим факторам не выглядят убедительными. Можно предложить более правдоподобную и обоснованную гипотезу о том, что "грубые" процессы самоорганизации планет Солнечной системы прошли без участия жизни, а "тонкая" регуляция условий происходит с помощью биосферы. С математической точки зрения описанный процесс можно соотнести с "грубым" поиском глобального минимума и "тонкой" доводкой решения после его достижения. Роль "грубой" отражает работа [6], позволившая уточнить теорию тяготения с помощью теории синергетического управления [7]. Роли "тонкой" компоненты способствует огромная скорость биохимических процессов с участием ферментов, на много порядков превосходящая химические процессы, которая позволяет чрезвычайно быстро и точно компенсировать (через множество вложенных циклов обратной связи) развитие локальных и глобальных нестационарностей. Ее обоснование предсказывает развиваемая теория.

Возможность биосферного гомеостаза вполне очевидна исходя из необходимости обеспечения "коридора" допустимых условий для существования живых организмов, аналогично тому, как организменный гомеостаз обеспечивает выживание клеток и поддержание эффективных режимов биохимических процессов в организме. Количественную (математическую) сторону организации биосферного гомеостаза, охватывающего экосистемы и организмы, мы обсудим в следующей публикации.

Эта внутренняя системная целостность биосферы в совокупности с механизмами стабилизирующей обратной связи позволяет не только констатировать неразрывную взаимосвязь и взаимозависимость всего живого на планете, но и конструктивно подойти к конструированию всеобъемлющей теории, которая непротиворечиво и с математической точностью позволяет описать биосферу, составляющие ее экосистемы и входящие в них организмы, как единый, согласованный, синергичный процесс.

Такая целостная математическая теория позволяет включить в себя не только описание живого, но и его окружение в виде атмосферы, гидросферы, литосферы, учесть факторы ближнего космоса, влияющие на жизнь на планете.

Следующим важным фактором является организация сложных природных систем в виде сетей элементов и связей между ними. Важнейшей особенностью сетевых структур, с количественной точки зрения, является возможность получения чрезвычайно богатого и гибко (адаптивно) перестраиваемого спектра реакций на изменение ситуаций и внешние воздействия. Это позволяет эффективно компенсировать деструктивные воздействия на биосферу и ее экосистемы. С ростом размеров и сложности сети увеличивается число стационарных состояний, которые могут быть в ней сформированы в ответ на соответствующие ситуации. А, следовательно, растет устойчивость экосистемы. В отличие

от редукционистских механизменных моделей, устойчивость которых падает с ростом сложности, свойства самоорганизующихся сетевых моделей совпадают со свойствами биосферы и ее экосистем как структурно, так и функционально. Это обеспечивает высокую реалистичность отображения количественных процессов в экосистемах и биосфере в целом сетевыми самоорганизующимися моделями, с одной стороны. А с другой стороны, изучение таких моделей крайне важно для понимания тонкой организации процессов в экосистемах.

Фрактальность (самоподобие) процессов и структур в сетях связано с понятием хаоса, имеющего в современной науке смысл сложного порядка с большим числом степеней свободы. Хаотические режимы в сетях возникают при нарушении синхронизации [15], которая может восстанавливаться благодаря адаптивным процессам. Фрактальные свойства сетей организмов позволяют создавать тонко организованные, согласованные и хорошо упорядоченные структуры, способные простираться на большую глубину. Фрактальные свойства живых систем (например, дерева) обычно далеко не столь хорошо упорядочены, как неживых (например, снежинки). Это связано с необходимостью координации сложнейших структур живого при адаптивной самоорганизации сетей организмов.

Как и Теория физических структур (ТФС) [9], Концепция Адаптивной Самоорганизации сложных систем (КАС) ставит своей задачей формирование минимально необходимого, но достаточного числа не дублирующих друг друга (базовых) понятий, требуемых для построения моделей биосферы, составляющих ее экосистем и организмов.

### **Эволюция**

В контексте рассмотренных фундаментальных процессов системной самоорганизации биосферы накопившиеся противоречия в представлениях об эволюции жизни [18] могут быть непротиворечиво разрешены в виде качественных и количественных моделей адаптивной самоорганизации биосферы. Проводя феноменологическую аналогию между гомеостазом организма и биосферы как процессов стремления системы к стационарным состояниям с целью сохранения динамической устойчивости их структур на множестве инвариантных многообразий, можно видеть координацию процессов адаптивной самоорганизации на всех иерархических уровнях биосферы и ее экосистем на временах жизни организмов (элементов системы). Эволюция предстает в виде адаптивной реакции биосферы как целостной системы на текущие состояние и изменения окружающей среды. Такая постановка вопроса снимает множество противоречий.

Эволюция в рассматриваемой постановке выглядит не как случайные флуктуации с отбором (с количественной, математической точки зрения, крайне неэффективный алгоритм при размерности выше десяти), а как весьма эффективный и реалистичный процесс адаптивной самоорганизации биосферы как сложной системы.

Как указано в [19]: "Можно с уверенностью сказать, что *наука переориентируется с механико-статистического понимания мира на системное*". Акцент на адаптивной самоорганизации сложных систем не означает другой крайности – призыва к полному отрицанию роли случайности. Здесь мы согласимся с Ч. Дарвиным [5]: случайность имеет место как дополнительный фактор, а не движущая сила эволюции. Эволюция живого – процесс многогранный, а глубина ее понимания связана с учетом этой многогранности и проверке работоспособности гипотез на системных количественных моделях.

### **Вещество, энергия, информация**

В работе [23] указывается, что с методологической точки зрения, все современные концепции развития жизни можно отнести к трем основным типам: субстратные (S), энергетические (E) и информационные (I). S-концепция основана на биохимических, генетических и морфологических представлениях. E-концепция связана с представлением о развитии сложных открытых систем, подвергающихся постоянной накачке энергией извне,

совершенствованием, ускорением и "умощнением" циклов вещества, возрастом переработки энергии каждой единицей структуры. I-концепция, в силу сложности ее развития для описания экосистем, оставалась практически неразвитой.

В то же время, наиболее впечатляющих результатов следует ожидать от объединения всех трех упомянутых концепций (S+E+I). Совершенствование I-концепции в рамках КАС позволяет без потери общности описать: формирование аттрактивного ландшафта, процесс сонастройки сложной структуры вложенных циклов открытых систем, подвергающихся постоянной накачке энергией извне, совершенствование, ускорение и "умощнение" циклов вещества, возрастание переработки энергии каждой единицей структуры экосистемы и др.

Отметим, что термин "информация" (за неимением подходящего эквивалента) используется здесь не в том же смысле, что в теории информации Шеннона. Информация сохраняется в структуре сетей в виде величин связей (и других параметров) и реализуется в виде соединяющихся, преобразующихся и разъединяющихся потоков (циклов) вещества и энергии. Эти потоки выливаются в широкий спектр адаптивных реакций системы на различные классы воздействий.

Можно условно выделить два способа представления моделей: модели процессов и модели структур. Первый из них более абстрактный. Он ближе к экосистемному представлению и акцентирован на потоках (S+E+I). В том числе, и с акцентом на одном из них. Второй способ более конкретный. Он может включать учет видового состава организмов биогеоценозов, структуру древостоя и подчиненных ярусов, описывать конкуренцию и соорганизацию между видами, моделировать конкретные территории с точностью вплоть до отдельных деревьев. Эти два класса моделей переводимы друг в друга.

### **О методах моделирования**

Как указано выше, в настоящее время имеет место большой разрыв между математической и полевой, экспериментальной экологией. Помимо рассмотренных причин, большие трудности создают существующие методы формализации (конкретизации и математизации) знаний специалиста об объекте его исследований. Дело в том, что для человека естественно идти сверху вниз: от общих, качественных представлений к все более конкретным и точным. На практике же, переход между качественными и количественными представлениями обычно оказывается очень резким. Задачу усложняет и то, что интуиция человека, привыкшего мыслить качественными представлениями, легко обманывается при переходе к количественным. Впрочем, при усложнении нелинейной модели в такой же ситуации вполне может оказаться и математик. Более того, в теории "русел" и "джокеров" [14] (для *простых* нелинейных моделей) возникает понятие "горизонт прогноза" и делается попытка возведения этого понятия в ранг закона.

Приблизить процесс формализации к удобному для человека позволяют методы компьютерной математики, основанные на адаптивных сетях. Основывается эта возможность на следующих соображениях:

1. Экосистемы формируются из адаптивных сетей организмов (растений, животных и т.д.). Сетевое представление задачи очень естественно. Искусственные адаптивные сети в моделях отражают своей структурой это фундаментальное свойство экосистем.

2. Сети с сильно отличающейся структурой, но сходными свойствами, могут продуцировать одинаковые результаты. Это позволяет создавать различные модели на типовых сетях с достаточно простой, однородной структурой. В то же время, одинаковые по принципу организации сети могут, при необходимости, демонстрировать очень разные результаты. Эти свойства настраиваются с помощью адаптации.

3. При имитации пошагового процесса формализации от общего качественного представления к точной структуре модели, "качественное" представление можно имитировать даже полносвязной сетью (все элементы сети связаны со всеми), не вдаваясь в детали. Такая сеть заведомо избыточна и будет адаптироваться лучше, чем после удаления

избыточных связей. Это дает преимущество в виде сразу работающей модели. Уже на первых этапах моделирования можно наблюдать и корректировать ее свойства, экспериментировать с ней, изучать ее. А затем шаг за шагом приближать ее структуру к изучаемому объекту.

4. При необходимости дальнейшего уточнения структуры сетей, они достаточно легко реконфигурируются. А полученные ранее результаты восстанавливаются повторной адаптацией сети. Таким образом, можно вести как упрощение, так и усложнение модели;

5. Можно формировать смешанные модели (сети), одни фрагменты которых (интересующие исследователя) детально "количественно" прорабатываются – уточняется их структура, а другие (системное окружение) – используются в виде "качественных" моделей, упомянутых в пункте 3.

6. В отличие от качественных представлений человека, и бесструктурные и структурированные модели будут давать одинаково точные количественные результаты.

7. При создании сетевых моделей может быть использован богатый инструментарий работы с искусственными нейронными сетями, разработанный в нейроинформатике (науке об обработке информации с помощью упрощенных моделей нейронных сетей мозга). Например, можно использовать процедуру *автоматического* упрощения сети до минимально возможной, но сохраняющей функции моделируемой системы. Упрощение можно делать с определенными ограничениями и, при необходимости, использовать мультивариантность этой процедуры для оценки спектра возможностей для перестройки структур модели. Таким образом, можно исследовать весь диапазон состояний модели – от предельно избыточного до минимально возможного.

8. В сетевых моделях могут быть получены статические и динамические режимы произвольного уровня сложности, корректируемые как в процессе настройки модели (идентификация), так и в процессе функционирования модели (адаптация).

9. Сетевые модели могут собираться из фрагментов и сонастраиваться друг с другом благодаря адаптации. Например, так можно собрать модель биосферы из моделей экосистем различных регионов планеты. Или модель взаимодействия биосферы с атмосферой, океаном, почвой и ближним космосом.

10. Модели на основе самоорганизующихся адаптивных сетей потенциально могут отражать наиболее общие и глубокие фундаментальные свойства сложных природных систем, упомянутые выше. И, в этом смысле, быть усовершенствованным аналогом механизменных моделей, поскольку из этого ядра фундаментальных свойств можно получить весь спектр возможных проявлений реальных экосистем и биосферы в целом. С другой стороны, бесструктурные сетевые модели могут использоваться как чисто имитационные. Таким образом, сетевые модели могут перекрывать весь диапазон модельных представлений – от глубоко фундаментальных до чисто имитационных. Благодаря этому, появляется возможность имитировать процесс постепенной формализации знаний, описанный в пункте 3.

Весь огромный диапазон этих потенциальных возможностей может использоваться по мере проработки математической части быстро развивающейся теории и при наличии соответствующего программного обеспечения, создаваемого в процессе ее развития.

Заметим также, что любая *система* взаимозависимых уравнений представляет собой *сеть* взаимосвязанных процессов. Роль элементов сети выполняют уравнения системы, а роль связей – коэффициенты при уравнениях, через которые пересчитываются решения других уравнений при вычислении их воздействия на текущее. Хотя такая структура уравнений обычно создается без осознания ее сетевой организации, структура природных систем естественным образом подталкивает к необходимости такого построения моделей.

Принципиально важно, что модели экосистем и биоценозов могут быть достаточно легко интегрированы в модель биосферы, либо сопрягаться с другими фрагментарными моделями.

Весьма важно, что появляется возможность относительно легкого сопряжения моделей наземных и спутниковых данных, что представляет в настоящее время достаточно серьезную проблему. Это имеет огромное значение для построения реалистичных моделей биосферы с любой требуемой степенью детальности и формирования высококачественных прогнозов.

Кроме того, совмещение космических и наземных масштабов позволяет подойти к построению комплексных моделей с учетом взаимодействия биосферы с атмосферой, гидросферой, почвой и ближним космосом (в первую очередь, флуктуациями солнечной освещенности).

Авторы благодарны Ю.В.Чайковскому за полезные обсуждения.

### Литература

1. Гелашвили Д.Б., Розенберг Г.С. Фрактальная организация экосистем разной масштабности // Вопросы практической экологии. Материалы научной конференции. Пенза, 2002. С. 42–43.
2. Гелашвили Д.Б. Фрактальные аспекты таксономического разнообразия / Д.Б. Гелашвили, В.Н. Якимов, Д.И. Иудин, Г.С. Розенберг, В.А. Солнцев, С.В. Саксонов, М.С. Снегирева // Журнал общей биологии. 2010. Т. 71. № 2. С. 115–130.
3. Генетическая типология и динамика леса [Электронный ресурс]. URL: <http://www.dynfor.ru> (дата обращения 28.10.2011).
4. Гиляров А.М. В поисках универсальных закономерностей организации сообществ: прогресс на пути нейтрализма // Журнал общей биологии. 2010. Т. 71. № 5. С. 386–401.
5. Дарвин Ч. Сочинения. Т. 3. Происхождение видов путем естественного отбора или сохранения благоприятных пород в борьбе за жизнь. М.;Л., 1939. 226 с.
6. Колесников А.А. Гравитация и самоорганизация. М.: КомКнига, 2006. 112 с.
7. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: Теория системного синтеза. М.: КомКнига, 2006. 240с.
8. Колесников Б.П. Кедровые леса Дальнего Востока. М.;Л.: Изд-во АН СССР, 1956. 261с.
9. Кулаков Ю.И. Теория физических структур. Новосибирск: Изд-во "Альфа Виста", 2003. 880 с.
10. Ланкин Ю.П., Хлебопрос Р.Г. Экологические основания концепции самоадаптирующихся сетей и систем с поисковым поведением // Инженерная экология. 2001. №2. С.2–26.
11. Левич А.П. Язык категорий и функторов как архетип количественного и динамического описания Мира // Системы и модели: границы интерпретаций. Томск: Томский гос. пед. ун-т, 2008. С. 25–33.
12. Ланкин Ю.П. Моделирование экологической сложности на основе самоорганизующихся адаптивных сетей // Материалы Национальной конференции с международным участием "Математическое моделирование в экологии" ЭкоМатМод-2009, 1–5 июня 2009. Пущино: ИФХиБПП РАН, 2009. С.153–154.
13. Миркин Б.М., Наумова Л.Г. Наука о растительности: история и современное состояние основных концепций. Уфа: Гилем, 1998. 410 с.
14. Малинецкий Г.Г. Синергетика и прогноз / Робототехника, прогноз, программирование / Под ред. Г.Г. Малинецкого. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. С.68–97.
15. Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю. Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. М.: Техносфера, 2003. 496с.
16. Суховольский В.Г. Моделирование экологических систем: проблемы и возможные решения // Материалы второй Национальной конференции с международным участием "Математическое моделирование в экологии" ЭкоМатМод-2011. Пущино: ИФХиБПП РАН, 2011. С. 259–261.



17. Усольцев В.А. Биоэкологические аспекты таксации фитомассы деревьев. Екатеринбург: УрО РАН, 1997. 216 с.
18. Чайковский Ю.В. Активный связный мир. Опыт теории эволюции жизни. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2008. 726 с.
19. Чайковский Ю.В. Элементы эволюционной диатропики. М.: Наука, 1990. 272с.
20. Braun-Blanquet J Pflanzensociologie. Grundzuge der Vegetationskunde. 3 Aufl. Wien-New York: Springer-Verlag, 1964. 865 s.
21. Lovelock J.E. Gaia: A new look at life on Earth. Oxford University Press, 1979. 252 p.
22. Lankin J.P. Adaptive simulation of atmospheric phenomena // SPIE, 2002. Vol. 4678. P. 669–680.
23. Lankin Yu.P., Pechurkin N.S. Perspectives for the information approach application to natural and artificial ecosystems investigation // 37th COSPAR SCIENTIFIC ASSEMBLY, Montreal, Canada. COSPAR2008; Paper-Number: F41-0014-08.
24. Westhoff V., Maarel E. van der. The Braun-Blanquet approach // Classification of plant communities / Ed. R.H. Whittaker. The Hague, 1978. P. 287–399.

**Рецензенты:**

Мысливец С. Г., д.ф.-м.н., профессор, заведующая кафедрой высшей математики 1, СФУ, г. Красноярск .

Шиятов С.Г., д.б.н., профессор, ведущий научный сотрудник, Институт Экологии растений и животных УрО РАН, г. Екатеринбург.